

文章编号: 1001-4888(2015)03-0305-08

基于小波包变换的梁式结构损伤定位方法^{*}

刘习军, 商开然, 张素侠, 孙良, 施睿智

(天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 本文针对梁式结构, 基于小波包变换理论, 提出一种新的损伤定位方法。该方法利用小波包变换将结构的响应分解到不同的模态, 引入曲率公式定义了新的小波能量指标, 使得能量指标对损伤位置更加敏感。根据工程实际, 构造了对应于结构区域的损伤指标。利用 D-S 证据理论对得到的各阶损伤指标进行数据融合, 从而优化了识别结果。通过数值模拟和实验, 对新提出的方法进行了验证, 结果表明该方法有效, 并可应用于工程实际。

关键词: 小波包变换; 损伤定位; D-S 证据理论

中图分类号: O327 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-216

0 引言

工程结构由于在长期使用过程中受到外界的物理和化学因素的影响, 很可能会产生损伤, 例如裂纹、局部刚度降低等, 这些损伤如果不能被及时发现, 则会随着时间连续积累, 如果一些关键的工程结构突然失效的话, 将会产生非常严重的后果。梁式结构在工程上有着非常广泛的应用, 尤其在交通运输领域, 更是起着至关重要的作用。所以对梁式结构进行损伤识别, 尽早的发现结构上的损伤有着非常重要的意义。

结构损伤识别的研究经过了几十年的发展产生了很多分支, 也取得了丰硕的成果, 由于其重要的工程实际意义, 近年来这一领域激起了越来越多的学者的兴趣。结构损伤识别的主要目的集中在判断结构是否发生损伤和对损伤进行准确的定位。结构损伤的动力识别方法通过分析结构动态响应数据来识别损伤, 这一类方法由于其无损性, 操作简单等优势受到众多学者的青睐。动力识别方法可分为两种, 一种是需要建立结构精确物理模型的损伤识别方法, 例如利用模型修正或者神经网络的方法, 这一类方法普遍需要较高的成本, 需要做大量的工作。另一种是直接利用采集的动态信号构造动力指纹^[1-5], 这一类方法简单直接, 易于操作。目前研究的比较多的动态指纹包括以下几类: 频率、振型、曲率模态、柔度曲率、模态应变能等。除此之外利用现代数学理论, 如小波变换、HHT 等理论, 对信号进行处理, 并以此构造动力指纹的方法也是目前的一个研究热点^[6-8]。

本文以小波包变换理论为基础, 构造了具有模态应变能物理意义的损伤指标, 并利用数据融合技术对损伤指标进行了优化处理, 以一个工程中较为常见的混凝土简支箱型梁为例, 对方法进行了数值验证。最后通过对一个损伤的三跨连续梁模型进行损伤识别实验对结果进行了实验验证。

^{*} 收稿日期: 2014-10-24; 修回日期: 2014-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号 51009107); 天津市基础重点基金(编号 13JCZDJC27100); 天津市青年基金(编号 13JCQNJC04200)

通讯作者: 刘习军(1956-), 男, 博导, 教授, 主要从事动力学与控制 and 结构健康监测方面的研究。Email: lxijun@tju.edu.cn

1 方法的理论基础

1.1 改进的小波包能量差

小波包是对小波多分辨率分析的一种改进,它能够同时对信号的低频和低频部分进行分解,并自适应地确定信号在不同频段的分辨率。信号通过小波包变换后可以分解的很细,而且不同的小波包分量在频域上混叠的部分很少。

由线型模态叠加理论可知,结构的振动响应为多个模态响应的叠加,在冲击荷载作用下,单一阶模态振动处于较窄的频带,所以可以通过小波包分解,选择适当的分解层数,将结构的振动响应分解到各个固有频率所在的频带内,从而将信号的单一阶模态响应提取出来。系统各测点响应信号经小波分解后的信号向量可表示为^[7]:

$$\mathbf{X} = \{x_k^1(t), x_k^2(t), \dots, x_k^{n-1}(t), x_k^n(t)\}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

其中 \mathbf{X} 表示各测点的响应信息; $x_k^j(t)$ 为第 j 个测点第 k 阶模态响应信号; n 为测点数目。

如果结构上各相邻测点之间距离都为 h , 引入曲率公式定义改进小波包能量为:

$$E_k^j = \int_0^T \left[\frac{x_k^{j+1}(t) + x_k^{j-1}(t) - 2x_k^j(t)}{h^2} \right]^2 dt$$

其中 T 表示采样周期。

为了消去损伤和完好结构所受的冲击荷载大小不同对损伤识别造成的影响,定义修正系数 λ 为:

$$\lambda_k = \frac{\sum_{l=2}^{n-1} E_{dk}^l}{\sum_{l=2}^{n-1} E_{uk}^l} \quad (3)$$

损伤前后,测点 l 响应的改进小波包能量差为:

$$\Delta E_k^l = E_{dk}^l - \lambda_k E_{uk}^l \quad (4)$$

式中,下标 d 表示损伤结构; u 表示完好结构。由于结构各个测点的同一阶模态响应是线性相关的,所以可以用这样的方式修正荷载不同造成的影响。

一般情况下,梁式结构的损伤只发生在局部较小的范围内,因为测点是离散布置的,所以损伤点一般位于两个测点之间,定义测点 l 和 $l+1$ 之间梁段的编号为 l , 与这一段梁相对应的损伤指标 (Damage Index) 为:

$$DI_k^l = \Delta E_k^l + \Delta E_k^{l+1} \quad (5)$$

该损伤指标具有模态应变能的物理意义^[5],当梁结构发生损伤时,损伤位置的指标 DI_l 将取较大的数值,可以依此判断损伤位置。由(5)式可以得到多组损伤指标,它们分别对应不同的模态响应。为了结合多组损伤指标的结果对结构损伤进行识别,采用数据融合理论对识别结果做进一步处理。

1.2 D-S 证据理论

Dempster-Shafer 证据理论 (简称 D-S 证据理论) 是对概率论的扩展^[9,10],通过建立命题和集合之间的一一对应关系,将命题的不确定问题转化为集合的不确定问题,用证据理论处理集合的不确定性。

设 A_1, A_2, \dots, A_n 为 n 个互不相容的事件, D_1, D_2, \dots, D_m 为 m 个传感器,第 j 个传感器判定第 i 个事件发生的概率为 $M_j(A_i)$, 则事件 P 发生的概率为:

$$M(P) = \frac{1}{K} \sum_{\cap A_i = P} \prod_{1 \leq j \leq m} M_j(A_i) \quad (6)$$

其中 $K = 1 - \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{1 \leq j \leq m} M_j(A_i) = \sum_{\cap A_i \neq \emptyset} \prod_{1 \leq j \leq m} M_j(A_i)$ 。

对式(5)得到的损伤指标依式(6)进行数据融合,首先构造基本概率赋值函数 P_k^l 为:

$$P_k^l = \alpha_k^l / \sum_{l=2}^{n-1} \alpha_k^l \quad (7)$$

其中 $\alpha_k^l = DI_k^l - \min\{DI_k\}$, $l = 2, 3, \dots, n-1$ 。

取结构的前 k 阶小波包能量差 ΔE_k , 计算基本概率赋值函数 P_k^l , 并代入(6)式,以计算得到的概率 M 作为结构损伤识别的损伤因子。

当结构上的损伤只存在于局部较小的区域时,损伤梁段的数目将远少于梁段总数,规定判断损伤发生的条件为:

$$M_k > s \sum_{i=2}^n M_i / n, s > 1 \quad (8)$$

当上式成立时,就认为第 k 段梁发生了损伤,式中 n 为梁段总数; s 为安全因子, s 越小,判断条件就越保守, s 取值过小的话,会导致识别结果没有意义。在本文中 s 取 3。

2 数值研究

2.1 数值算例

以一个混凝土简支箱型梁为例^[11],梁长为 32m, $E=34.5\text{GPa}$, $\rho=2500\text{kg/m}^3$, $A=8.97\text{m}^2$, $I=11.1\text{m}^4$ 。简支梁模型如图 1 所示,共划分为 32 个单元,在梁上布置 16 个传感器,用单元刚度的下降来模拟损伤。损伤工况 1 为单元 8 刚度降低百分之 10,损伤工况 2 为单元 16 刚度下降百分之 20,工况 3 为单元 10 和 24 刚度同时下降百分之 10。激励点设在节点 3,在激励点作用峰值大小为 100kN 的冲击荷载,用 Newmark- β 法求解梁的动力响应,时间间隔为 0.0025s,采样点数为 1500。将梁上各个测点的加速度响应作为输入响应,计算各梁段的 DI 值。

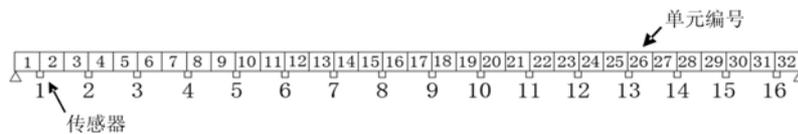


图 1 简支梁示意图

Fig.1 Sketch of the simply-supported bridge

2.2 数值结果分析

完好梁测点 2 加速度响应的时程和频谱如图 2 所示,由此可知该梁的前三阶固有频率分别为 6.25Hz、24.81Hz、50.98Hz。此响应经过四尺度小波包变换后的前四个小波包分量(编号为 $4-i, i=0,1,2,3$)的时程和频谱如图 3 所示。从图上看,每一个小波分量都处于较窄的频带内,小波包分量 4-0 所处的频段在结构的第一阶固有频率附近,而小波包分量 4-1 和 4-3 所处的频段在结构的第二阶固有频率附近。将每一个小波包分量的频谱图上最大幅值对应的频率看做是该小波包分量的中心频率,在某尺度下,所有小波包分量的中心频率分布如图 4 所示,认为中心频率在结构第 i 阶固有频率附近的小波包分量响应的合响应为结构的第 i 阶模态振动响应。通过比较结构的固有频率和各小波包分量的中心频率,经筛选后确定结构的第一阶模态响应为原信号经过 4 尺度小波包分解后的第 1 个小波包分量,第二阶模态响应为原信号经过 5 尺度小波包分解后的第 2 个和第 6 个小波包分量的叠加,第三阶模态响应为原信号经过 5 尺度小波包分解后的第 4 个和第 12 个小波包分量的叠加。

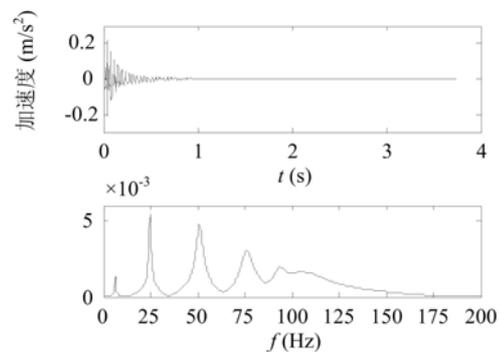


图 2 加速度响应时程及频谱(测点 2)

Fig.2 Acceleration signal time-history and frequency spectrum

图 5 为由前三阶模态响应计算出的三组损伤指标 $DI_i (i=1,2,3)$ 的值,对于损伤工况 1 和损伤工况 3,在损伤位置处三组损伤指标都得到了较大的数值;对于损伤工况 2, DI_1 和 DI_3 的识别结果能够较明显地反映出损伤的位置,但是 DI_2 的效果却不明显,这是因为工况 2 的损伤位置在跨中,位于第二阶梁型的节点,即便如此,根据其他两组损伤指标也已经足以识别它的损伤。工况 2 的损伤程度是最大的,由此计算出来的损伤指标也大于其他两种工况,说明指标 DI 能够反映结构损伤程度的大小。

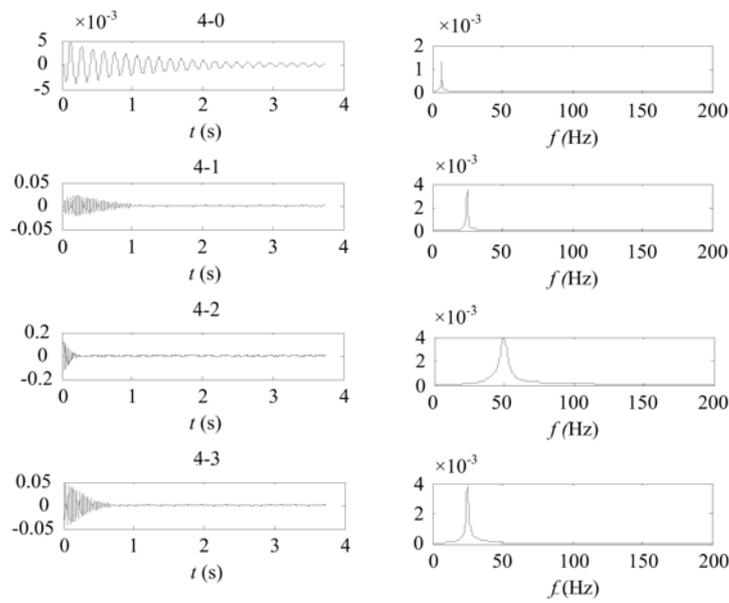


图3 前四个小波包分量的时程和频谱

Fig. 3 The wavelet packet component and its frequency spectrum (first 4 components)

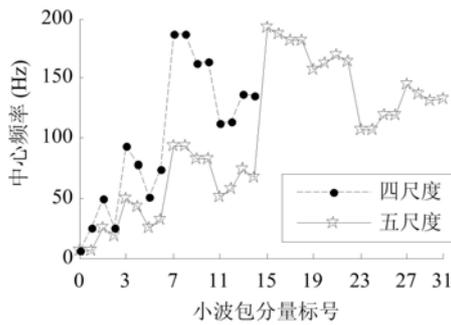
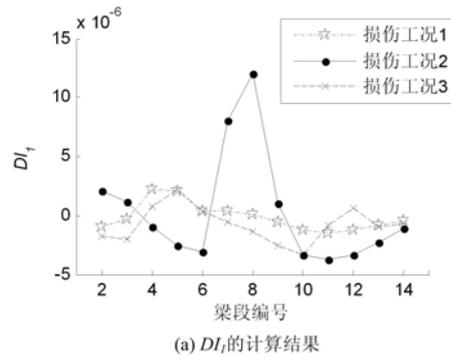
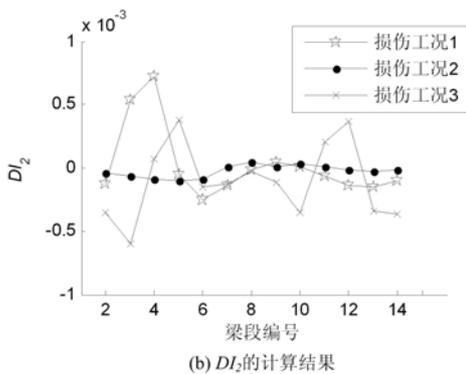


图4 各小波包分量的中心频率分布

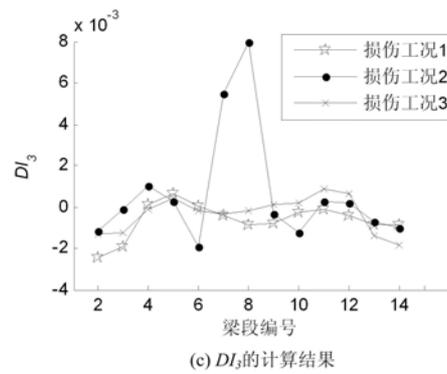
Fig. 4 The central frequency distribution of each wavelet packet component



(a) DI_1 的计算结果



(b) DI_2 的计算结果



(c) DI_3 的计算结果

图5 DI 的计算结果

Fig. 5 Calculation results of DI

为了使损伤识别结果更准确,采用数据融合技术对三组损伤指标进行融合,所用的数据融合理论为D-S证据理论,将计算出来的三组损伤指标代入式(6)和式(7),以计算得到的概率M值作为损伤因子,用它来判断损伤的位置。计算出来的M值如图6所示。相比于DI值的识别结果,经过数据融合后的

损伤因子 M 对损伤位置更敏感。将计算结果代入(8)式,得到最终的损伤定位结果与实际情况相符,说明方法是正确的。

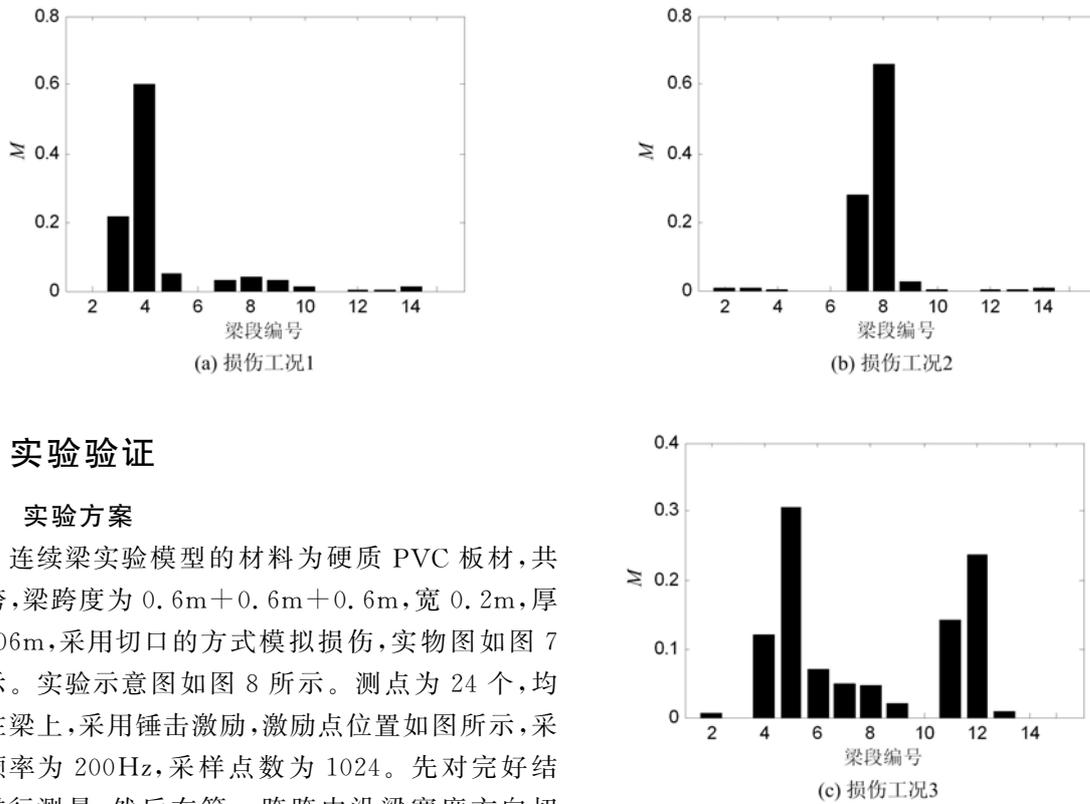


图 6 M值的计算结果

Fig. 6 Calculation results of M

3 实验验证

3.1 实验方案

连续梁实验模型的材料为硬质 PVC 板材,共三跨,梁跨度为 $0.6\text{m}+0.6\text{m}+0.6\text{m}$,宽 0.2m ,厚 0.006m ,采用切口的方式模拟损伤,实物图如图 7 所示。实验示意图如图 8 所示。测点为 24 个,均布在梁上,采用锤击激励,激励点位置如图所示,采样频率为 200Hz ,采样点数为 1024。先对完好结构进行测量,然后在第一跨跨中沿梁宽度方向切口,切口深度为 0.4cm ,作为单处损伤的工况,测试完成后,再对桥梁的第二跨跨中用相同的方式切口,作为多处损伤的工况。测试时三跨梁分开测量,每次只测一跨。以测得的加速度响应为输入响应,通过小波包变换提取出结构的前三阶模态响应,计算损伤指标 DI 并对其进行数据融合,以融合后的结果作为对损伤进行定位的损伤因子。第 i 跨梁 8 个传感器之间的 7 段梁分别编号 $i.1, i.2, \dots, i.7$,由于计算能量时引用了曲率公式,所以每一跨两端的两段梁 $i.1$ 和 $i.7$ 的损伤指标 DI 无法计算,对于桥梁结构,靠近支座的位置不易发生损伤,在保证靠近支座的部分没有损伤发生,即梁段 $i.1$ 和 $i.7$ 是完好的情况下,方法能够保证在理论上是严密的。



图 7 连续梁模型和实验设备

Fig. 7 Continuous bridge test model and the experimental installation

3.2 识别结果

截取结构的前三阶模态响应进行损伤识别,通过比较频率,确定结构的一阶模态响应为原信号经过 5 尺度小波包分解后的第 8 个和第 9 个小波包分量的叠加,二阶模态响应为原信号经过 5 尺度小波包分解后的第 6 个和第 7 个小波包分量的叠加,三阶模态响应为原信号经过 5 尺度小波包分解后的第 26

个和第 28 个小波包分量的叠加。模态响应的小波包分解结果如图 9 所示,左边的图是响应的时程,右边的图是响应的频谱图,从图上看结构的前三阶的模态响应都被准确的提取出来了。

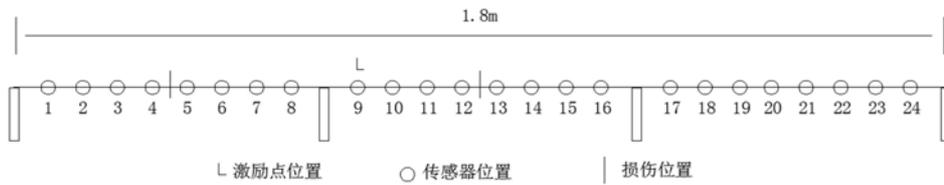


图 8 实验示意图

Fig. 8 Sketch of the experiment

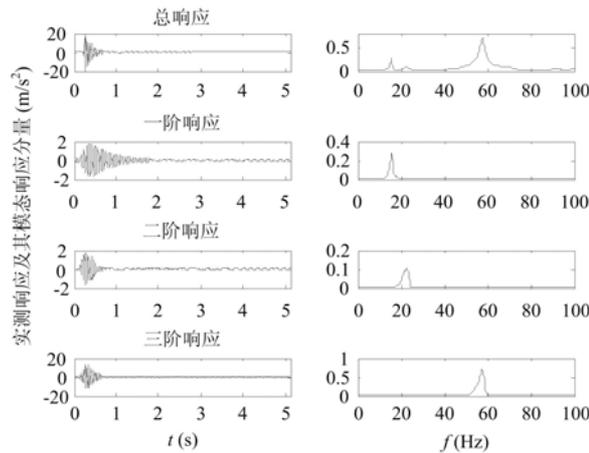


图 9 实测信号的小波包分解结果

Fig. 9 The decomposed results of measured signal by wavelet packet method

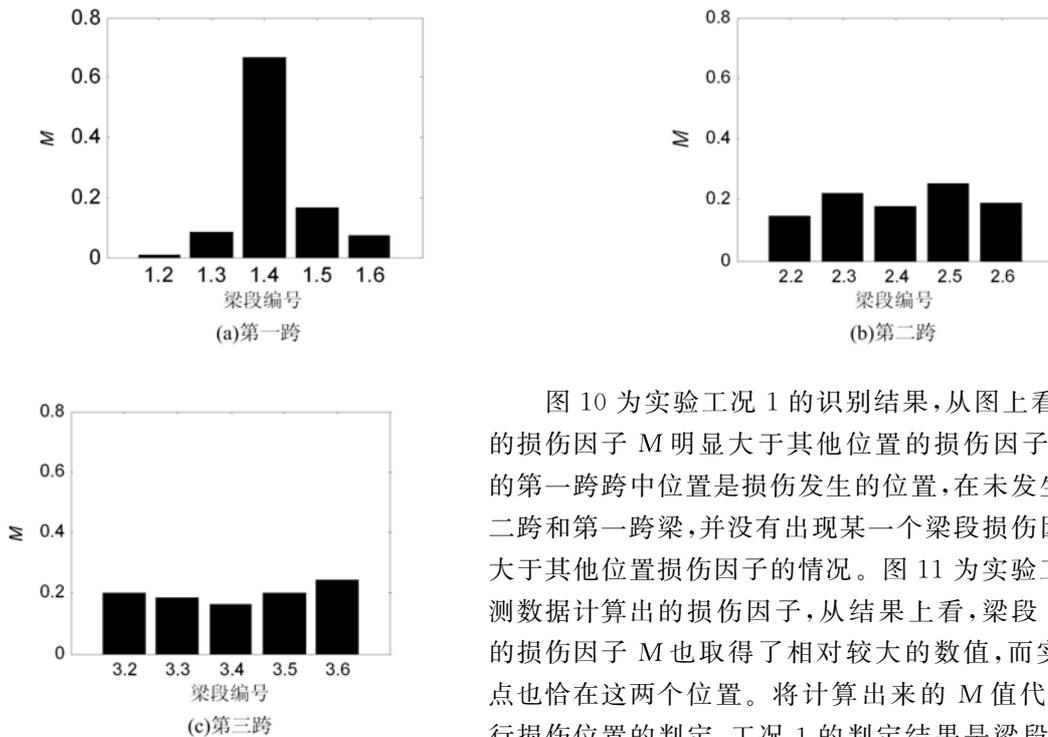


图 10 损伤工况 1 的实验结果

Fig. 10 Experiment results of damage case 1

图 10 为实验工况 1 的识别结果,从图上看,梁段 1.4 的损伤因子 M 明显大于其他位置的损伤因子,与之对应的第一跨跨中位置是损伤发生的位置,在未发生损伤的第二跨和第一跨梁,并没有出现某一个梁段损伤因子的值远大于其他位置损伤因子的情况。图 11 为实验工况 2 由实测数据计算出的损伤因子,从结果上看,梁段 1.4 和 2.4 的损伤因子 M 也取得了相对较大的数值,而实际的损伤点也恰在这两个位置。将计算出来的 M 值代入式(8)进行损伤位置的判定,工况 1 的判定结果是梁段 1.4 损伤,实验工况 2 的判定结果为梁段 1.4 和 2.4 损伤。测试结果能够准确地识别出损伤发生的位置,说明方法是科学可

行的。

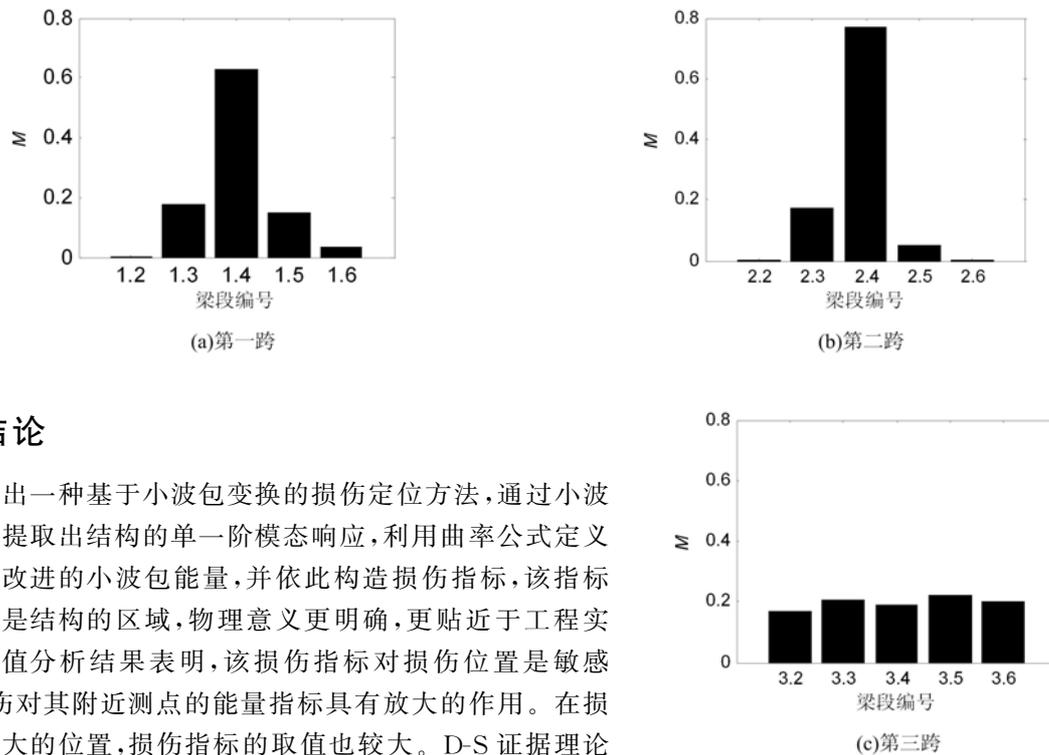


图 11 损伤工况 2 的实验结果

Fig. 11 Experiment results of damage case 2

4 结论

提出一种基于小波包变换的损伤定位方法,通过小波包变换提取出结构的单一阶模态响应,利用曲率公式定义了一种改进的小波包能量,并依此构造损伤指标,该指标对应的是结构的区域,物理意义更明确,更贴近于工程实际。数值分析结果表明,该损伤指标对损伤位置是敏感的,损伤对其附近测点的能量指标具有放大的作用。在损伤程度大的位置,损伤指标的取值也较大。D-S 证据理论能将得到的各组损伤能量指标很好地融合以达到突出损伤位置的目的。将该指标应用于一个三跨连续梁的损伤识别实验,实验结果表明该方法是有用的,并可应用于工程实际。

参考文献:

- [1] Lakshmanana N, Raghuprasadb B K, Gopalakrishnana N, et al. Detection of contiguous and distributed damage through contours of equal frequency change[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329:1310-1331.
- [2] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2):321-332.
- [3] Li Y Y, Cheng L, Yam L H, et al. Identification of damage locations for plate-like Structures using damage sensitive indices: strain modal approach[J]. Computers & Structures, 2002, 80(25):1881-1194.
- [4] 李功宇, 郑华文. 不损伤结构的曲率模态分析[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(2):136-141 (Li Gongyu, Zheng Huawen. Studies on curvature modal analysis of damaged structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2002, 22(2):136-141(in Chinese))
- [5] 史治宇, 罗绍湘, 张令弥. 结构破损定位的单元模态应变能变化率法[J]. 振动工程学报, 1998, 11(3):356-360 (Shi Zhiyu, Luo Shaoxiang, Zhang Lingmi. Determination structure damage location based on elemental modal energy change [J]. Journal of vibration Engineering, 1998, 11(3):356-360(in Chinese))
- [6] 张立新, 励争, 苏先越. 小波变换理论在损伤探测中的应用[J]. 实验力学, 2002, 17(1):17-22 (Zhang Lixin, Li Zheng, Su Xianyue. Application of wavelet transform analysis in defects-detection [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(1):17-22(in Chinese))
- [7] 相林杰. 基于小波分析的桥梁结构损伤识别方法研究[D]. 天津大学, 2013 (Xiang Linjie. Study on damage identification method of bridge structures based on wavelet analysis [D]. Tianjin University, 2013 (in Chinese))
- [8] 丁麒, 孟光, 李鸿光. 基于 Hilbert-Huang 变换的梁结构损伤识别方法研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9):180-184 (Qi Ding, Meng Guang, Li Hongguang. Beam damage identification method based on Hilbert-Huang transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(9):180-184 (in Chinese))

- [9] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued maoong [J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1967, 38:325–339.
- [10] Shefer G A. *A mathematical theory of evidence* [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1976.
- [11] 王少钦, 夏禾, 郭薇薇 等. 变速移动荷载作用下简支梁桥的动力响应及共振分析[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(2):26–30 (Wang Shaoqin, Xia He, Guo Weiwei, et al. Dynamic response and response analyses for a simply-supported bridge under speed-varying loads [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(2):26–30 (in Chinese))

On the Damage Localization of Beam Structure Based on Wavelet Packet Transform

LIU Xi-jun, SHANG Kai-ran, ZHANG Su-xia, SUN Liang, SHI Rui-zhi

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at beam structures and based on wavelet packet transform, a new damage localization method is proposed in this paper. This method uses WPT to decompose structure responding signal into different modes, and introduces curvature algorithm to define new WP-energy index, which is more sensitive to damage position. According to engineering practice, the proposed damage indexes corresponding to structure regions were constructed. Then, based on D-S evidence theory, data fusion of obtained each order damage indexes was proceeded, so that the damage detection results were optimized. This newly proposed method was verified through numerical simulation and experiment. Results show that this method can efficiently identify structure damage and is applicable in engineering practice.

Keywords: wavelet packet transform (WPT); damage localization; D-S evidence theory; experiment